میکروانبر FGM با تحریک نیروی الکترواستاتیکی تحت تأثیر ممان حرارتی*

موسی رضائی(۱)   ناصر شرفخانی(۲)   عطا ا... چیت‌ساز خوئی(۳)

چکیده *در تحقیقات پیشین رفتار مکانیکی میکروانبرهای ساخته شده از یک ماده همگن، مطالعه شده است. در این مقاله با توجه به خصوصیات مطلوب مواد مدرج تابعی (Functionally graded materials (FGMs))، همانند: مقاومت بالای حرارتی و مقاومت به سایش، رفتار مکانیکی میکروانبر ساخته شده از این نوع مواد، تحت اعمال ولتاژ DC و تغییرات دمایی بررسی شده است. میکروانبر مورد نظر از دو میکروتیر FGM که به صورت متقارن در مقابل هم قرار گرفته‌اند تشکیل شده است. یک سطح میکروتیرهای میکروانبر FGM از فلز خالص تشکیل شده است. سطح دیگر، ترکیبی از فلز و سرامیک است که درصد سرامیک به صورت تابع نمایی در ضخامت میکروتیرها تغییر می‌کند. معادلات غیرخطی حاکم بر رفتار استاتیکی میکروانبر استخراج و به کمک روش خطی‌سازی مرتبه به مرتبه و روش‌گالرکین حل شده است. پاسخ و پایداری سیستم به ازای ولتاژهای مختلف بررسی و تأثیر ابعاد هندسی، درصد سرامیک و تابع تغییرات آن در میکروتیرها و تأثیر تغییر درجه حرارت بر رفتار مکانیکی و پایداری سیستم، نشان داده شده است.*

واژه‌های کلیدی میکروانبر FGM، نیروی الکترواستاتیک، ولتاژ ناپایداری، ممان حرارتی

Electrostatically Actuated FGM Microgripper under the Effect of Thermal Moment

M. Rezaee   N. Sharafkhani   A. Chitsaz Khoei

Abstract *In previous researches, mechanical behavior of a microgripper with homogenous and the same material has been studied. In this paper considering the desired characteristics of FGMs, as a good thermal and wear resistance, the mechanical behavior of FGM microgripper under DC voltage and temperature variations is investigated. It is assumed that the two microbeams of the FGM microgripper are mounted symmetrically against each other and one side of the microbeams is made of a pure metal the other side is a mixture of metal and ceramic, and the percentage of ceramic varies exponentially through the microbeams thickness. The nonlinear equations governing the static deflection of microbeams due to the application of DC voltage and the temperature changes are derived and solved using the step by step linearization method and the Galerkin method. The response and the stability of the system against the variation of DC voltage and temperature are investigated. Also, the effect of geometrical dimensions, ceramic percentage and its variations through the microbeams thickness on the mechanical behavior and the system stability are studied.*

Key Words FGM Microgripper, Electrostatic Force, Pull-in Voltage, Thermal Moment

* نسخه نخست مقاله در تاریخ ۹۰/۳/۲٤، اولین پذیرش آن در تاریخ ۹۰/۱۰/۱٤ و نسخه آماده چاپ آن در تاریخ ۹۱/٤/۷ به دفتر نشریه رسیده‌است.

(۱) نویسنده‌ی مسؤول: دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز
(۲) دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه
(۳) دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز

مقدمه

با رشد روزافزون استفاده از قطعات با مقیاس‌های میکرو و نانو در زمینه‌های مختلف، استفاده از میکروانبرها نیز به عنوان ابزاری که برای برداشتن و جابه‌جایی آنها کاربرد دارد، گسترش یافته است. از آن جمله می‌توان به استفاده از آنها در علوم زیست‌شناسی، میکروروبات‌ها و تجهیزات جراحی اشاره کرد. مکانیزم‌های مختلفی هم‌چون نیروی الکترواستاتیک [1-3]، پیزوالکتریک [4-6]، پنوماتیک [7]، مغناطیس [8]، مکانیک [9] و الکتروترمال [10-15] برای به حرکت در آوردن بازوی میکروانبرها مورد استفاده قرار می‌گیرد. نیروی الکترواستاتیک در ساختارهایی هم‌چون میکروپمپ‌ها [16]، سویچ‌ها [17-18] ، میکروآینه‌ها [19]، میکرورزوناتورها [20]، میکرومحرک‌ها [21-22] و خازن‌های قابل تنظیم [23] کاربرد دارد؛ که به عنوان یکی از مهمترین مکانیزم‌های محرک در میکروانبرها با اعمال ولتاژ به بازوهای میکروانبر ایجاد می‌شود. با افزایش ولتاژ نیروی الکترواستاتیک مقدار آن نیز افزایش می‌یابد و باعث حرکت بیشتر بازوها به سمت همدیگر می‌شود. با رسیدن ولتاژ به یک مقدار بحرانی که همان ولتاژ ناپایداری سیستم می‌باشد نیروی بازگرداننده‌ی الاستیک نمی‌تواند نیروی الکترواستاتیک را خنثی نماید و ناپایداری اتفاق می‌افتد. مقالات متعددی در مورد میکروانبرهایی که با نیروی محرک الکترواستاتیک کار می‌کنند وجود دارد که از آن جمله می‌توان به مقاله‌ی کیم و همکاران [24] در مورد طراحی میکروانبر پلی‌سیلیکون، مقاله‌ی بیگان‌زولی و همکاران [25] در مورد جابه‌جایی قطعات در ابعاد میکرو، مقاله‌ی میلت و همکاران [26] در مورد بررسی میکروانبر با مکانیزم تقویت کننده، مقاله‌ی کاواماتو و همکاران [27] در مورد طراحی میکروانبری برای برداشتن قطعات کوچک با قطر ۱ تا ۱۰۰ میکرومتر، مقاله‌ی ویرزبیکی و همکاران [28] در مورد مطالعه‌ی میکروانبر برای استفاده در رگ‌های خونی، مقاله‌ی چن و همکاران [29] در مورد طراحی نوعی میکروانبر هیبریدی و مقاله‌ی بزاز و همکاران [30] در مورد طراحی نوعی میکروانبر با سنسورهای تماسی قابل تنظیم، اشاره کرد.

در مواردی لازم است که از میکروانبرها در محیط‌های گرم و یا برای برداشتن قطعات با دمای بالا استفاده کرد. در این صورت باید از مواد با مقاومت حرارتی بالا در مواد تشکیل دهنده‌ی بازوهای میکروانبر استفاده کرد تا مانع از انتقال حرارت به سیستم شود. علاوه بر مقاومت بالای حرارتی، لازم است مواد تشکیل دهنده‌ی میکروانبر خواص مکانیکی خوبی نیز داشته باشند؛ که بدین منظور استفاده از مواد FGM در بازوهای میکروانبر پیشنهاد می‌شود.

FGMs مواد جدیدی هستند که ترکیبی از دو ماده‌ی مختلف، معمولاً فلز و سرامیک می‌باشند و خصوصیات آنها در ضخامت ساختار مورد نظر تحت تابع مشخصی تغییر می‌کند [31]. ساختارهای FGM چون ترکیبی از دو ماده‌ی مختلف با خصوصیات مختلف می‌باشند نسبت به ساختارهای عادی که از یک ماده با خصوصیات یک‌نواخت و یکسان تشکیل می‌شوند برتری‌هایی دارند. به عنوان مثال FGMs که از فلز و سرامیک تشکیل می‌شوند به علت مقاومت حرارتی بالاتر سرامیک و ویژگی‌های مکانیکی قوی‌تر فلز، عملکرد بهتری نسبت به مواد مهندسی متداول در محیط‌هایی با دمای بالاتر دارند [32].

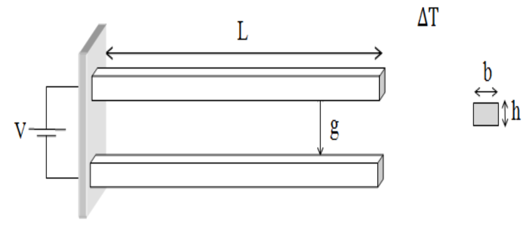
مفهوم FGM برای اولین بار در سال ۱۹۸٤ در ژاپن و در پروژه‌ی سفینه فضایی مطرح شد. پس از آن به علت ویژگی‌های خاص، استفاده از آنها در بسیاری از زمینه‌ها مانند: صنایع نظامی، صنایع خودرو سازی، تجهیزات پزشکی، نیمه هادی‌ها و ابزارهایی که در دماهای بالا کار می‌کنند، گسترش یافت [33-41]. اخیراً نیز استفاده از FGM در سیستم‌های میکرو و نانو رواج یافته است که از آن جمله می‌توان به استفاده از آنها در میکروتیرها و میکرو ورق‌ها اشاره کرد [42-43]. در

مورد رفتار مکانیکی تیر FGM تحت اثر نیروهای مختلف، تحقیقات متعددی انجام شده است. لی [44] به بررسی رفتار استاتیکی و دینامیکی تیر FGM اویلر- برنولی و تیموشنکو پرداخته است. محمدی الستی و همکاران [45] رفتار میکروتیر FGM ناشی از اعمال ولتاژ و ممان حرارتی را مطالعه کرده‌اند. کنگ و همکاران [46] خیز تیر FGM یک‌سرگیردار تحت نیروی وارد به انتهای آن را مورد مطالعه قرار داده‌اند. شمشک [47] ارتعاشات ناشی از حرکت یک جرم بر روی تیر FGM را بررسی کرده است. مورین و همکاران [48] حل دقیقی برای معادله‌ی ارتعاش خمشی تیر FGM ارایه کرده‌اند.

مرور تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که تاکنون رفتار مکانیکی میکروانبر ساخته شده از یک جفت میکروتیر FGM مطالعه نشده است و تحقیقات قبلی عمدتاً به بررسی رفتار مکانیکی تک تیر FGM محدود می‌باشد. در این مقاله رفتار مکانیکی میکروانبر متشکل از یک جفت میکروتیر FGM تحت اثر نیروی الکترواستاتیک و تغییر درجه‌ی حرارت بررسی شده و پاسخ استاتیکی و پایداری سیستم تحت شرایط مختلف نشان داده شده است. با وجود این که حرارت می‌تواند به عنوان یک نیروی محرک باعث حرکت بازوهای میکروانبر شود ولی در مواردی لازم است برای برداشتن قطعات با اندازه‌های مختلف، مانع از جابه‌جایی اولیه بازوهای میکروانبر در محیط‌هایی با دمای بالا شد. بدین منظور، تأثیر آرایش مواد تشکیل دهنده میکروتیرها مورد بررسی قرار گرفته و آرایش مناسب برای رفع این مشکل ارایه شده است.

مدل سازی ریاضی

میکروانبر FGM که از یک جفت میکروتیر FGM یک‌سرگیردار به طول L، ضخامت h و پهنای b تشکیل شده است در شکل (۱) نشان داده شده است. فاصله‌ی تیرها از هم g است و تحت اثر تغییرات دمایی و نیروی پیوسته‌ی الکترواستاتیکی ایجاد شده توسط یک منبع ولتاژ DC، می‌باشند. حرکت میکروتیرها در جهت خلاف هم بوده و با افزایش ولتاژ یا دما فاصله‌ی بین میکروتیرها g، کاهش می‌یابد.



شکل ۱ نمای کلی از یک میکروانبر تحت اثر نیروی الکترواستاتیک و تغییر درجه حرارت

تغییر خصوصیات میکروانبر FGM، شامل مدول الاستیسیته E، چگالی ρ و ضریب انبساط حرارتی خطی α در ضخامت تیر به صورت تابع زیر در نظر گرفته می‌شود [45]:

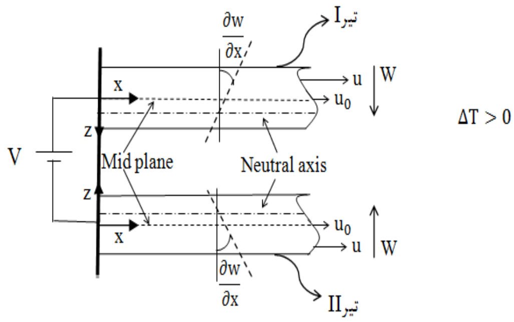
$$P = P_m e^{\beta\left(z+\frac{h}{2}\right)} \quad (\text{۱-الف})$$

$$\beta = \frac{1}{h}\ln\left[\frac{V_m P_m + V_c P_c}{P_m}\right] \quad (\text{۱-ب})$$

که در آن P ویژگی‌های تیر مورد نظر، m و c نمادهای فلز و سرامیک و V_m و V_c نشان دهنده‌ی درصد حجمی فلز و سرامیک در ضخامت تیر می‌باشند؛ که یک سطح آن از فلز خالص تشکیل شده و با حرکت در امتداد ضخامت، مطابق رابطه (۱)، درصد فلز، کاهش و درصد سرامیک، افزایش می‌یابد، طوری که سطح دیگر ترکیبی از فلز و سرامیک می‌باشد. البته با توجه به این که برای ایجاد نیروی الکترواستاتیکی باید هر دو تیر رسانا باشند، بنابراین در حالتی که $V_c = 100\%$ باشد، لازم است سطح تیرها با لایه‌ای بسیار نازک (در مقیاس نانو) از یک رسانا

مانند طلا پوشانده شود [45].

شکل (۲)، نمای جانبی میکروتیرهای میکروانبر را نشان می‌دهد که تحت تأثیر نیروی الکترواستاتیک و تغییرات دمایی دچار کرنش شده است. u_0 نشان دهنده جابه‌جایی صفحه‌ی میانی، u نشان دهنده‌ی جابه‌جایی هر نقطه‌ی دیگری از ضخامت تیر در امتداد محور x، w نشان دهنده‌ی جابه‌جایی عرضی تیر و $\frac{\partial w}{\partial x}$ شیب تیر می‌باشد. باید توجه شود که در حالت کلی به علت عدم تقارن در خصوصیات میکروانبر مورد نظر، صفحه‌ی میانی، سطح خنثی نمی‌باشد.



شکل ۲ نمای جانبی میکروتیرهای میکروانبر FGM

برای میکروتیرهای مورد نظر با توجه به این که نسبت h/L به اندازه‌ی کافی کوچک می‌باشد، می‌توان از کرنش در امتداد سطح مقطع چشم‌پوشی کرد. کرنش کلی ε_{Tot} در امتداد محور x، شامل کرنش مکانیکی ε و کرنش حرارتی ε_T می‌باشد که بر اساس تئوری اویلر- برنولی به صورت زیر خواهد بود [49]:

$$u = u_0 - z\frac{\partial w}{\partial x} \quad \text{(۲- الف)}$$

$$\varepsilon = \frac{\partial u_0}{\partial x} - z\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad \text{(۲- ب)}$$

$$\varepsilon_T = \alpha\Delta T, \quad \Delta T = T - T_0 \quad \text{(۲- ج)}$$

$$\varepsilon_{Tot} = \varepsilon_T + \varepsilon \quad \text{(۲- د)}$$

در روابط فوق، ΔT تغییر دمای محیط نسبت به دمای اولیه T_0 می‌باشد و z از صفحه‌ی میانی اندازه‌گیری می‌شود. با استفاده از قانون هوک و معادلات (۲)، روابط تنش و کرنش برای تیر اویلر- برنولی در سطح مقطع مورد نظر به صورت زیر خواهد بود [49]:

$$\sigma = E\frac{\partial u_0}{\partial x} - Ez\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - E\alpha\Delta T \quad \text{(۳)}$$

با توجه به عدم وجود نیروی محوری در انتهای آزاد تیرها، خواهیم داشت:

$$\int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma dA = 0 \quad \text{(٤)}$$

با جای‌گذاری معادله‌ی (۳) در معادله‌ی (٤)، $\frac{\partial u_0}{\partial x}$ به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\frac{\partial u_0}{\partial x} = \frac{\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right)\int Ezbdz + \Delta T\int E\alpha bdz}{\int Ebdz} \quad \text{(۵)}$$

ممان خمشی M در موقعیت x به صورت زیر خواهد بود:

$$\int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma z dA = M \quad \text{(٦)}$$

با جای‌گذاری معادلات (۵ و ۳) در معادله‌ی (٦)، معادله‌ی حاکم بر جابه‌جایی استاتیکی میکروتیرهای FGM مورد نظر به دست می‌آید که در آن M_T ممان حرارتی می‌باشد:

$$-(EI)_{FGM}\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = M + M_T \quad \text{(۷- الف)}$$

$$M_T=\left[\int\left(E\alpha-E\frac{\int E\alpha bdz}{\int Ebdz}\right)zbdz\right]\Delta T \quad (\text{۷- ب})$$

شرایط مرزی برای هر یک از میکروتیرها در محل گیردار به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{\partial w}{\partial x}(0,t)=0 \qquad w(0,t)=0 \quad (\text{۸})$$

میکروانبر FGM فقط تحت اثر نیروی غیرخطی الکترواستاتیک. زمانی که تغییرات دمایی محیط صفر باشد، $\Delta T=0$، آن‌گاه $M_T=0$ خواهد بود و تنها نیروی الکترواستاتیکی به سیستم وارد خواهد شد.

نیروی الکترواستاتیکی وارد بر واحد طول بین دو الکترود تحت اثر ولتاژ DC که یکی از آن‌ها ثابت و دیگری متحرک می‌باشد به صورت زیر است [18]:

$$F_{ELC}=\frac{\varepsilon_0 bV^2}{2(g-w)^2} \quad (\text{۹- الف})$$

که در آن ε_0 ثابت گذردهی الکتریکی فضای بین دو تیر، V ولتاژ DC اعمالی و w نشان‌دهنده‌ی جابه‌جایی الکترود متحرک می‌باشد. در این مقاله با توجه به این که هر دو تیر (الکترود) متحرک می‌باشند فاصله‌ی بین آنها ناشی از حرکت هر دو تیر، $(g-w_I-w_{II})$ خواهد بود که w_I و w_{II} به ترتیب نشان‌دهنده‌ی تابع خیز تیرهای I و II میکروانبر می‌باشد.

در چنین شرایطی، معادلات حاکم بر جابه‌جایی استاتیکی هر یک از میکروتیرها به صورت زیر خواهند بود[45]:

$$-(EI)_{FGM}\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}=M \quad (\text{۹- ب})$$

$$\frac{\partial^2 M}{\partial x^2}=-F_{ELC}=-\frac{\varepsilon_0 bV^2}{2(g-w_I-w_{II})^2} \quad (\text{۹- ج})$$

برای بی‌بعدسازی معادلات، پارامتری‌های بی‌بعد $\hat{x}$ و $\hat{w}$ را به عنوان مختصه‌ی فضایی و جابه‌جایی عرضی تعریف می‌کنیم:

$$\hat{x}=\frac{x}{L} \qquad \hat{w}=\frac{w}{g} \quad (\text{۱۰})$$

با جای‌گذاری پارامترهای بی‌بعد، معادله‌ی بی‌بعد به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\alpha_1\frac{\partial^4\hat{w}}{\partial\hat{x}^4}=\alpha_2 F \quad (\text{۱۱- الف})$$

$$\alpha_1=\frac{(EI)_{FGM}}{(EI)_m}, \qquad \alpha_2=\frac{\varepsilon_0 bL^4}{2(EI)_m(g^3)} \quad (\text{۱۱- ب})$$

$$(EI)_m=\frac{(E_m)(bh^3)}{12}, \quad F=\frac{V^2}{\left(1-\hat{w}_I-\hat{w}_{II}\right)^2} \quad (\text{۱۱- ج})$$

میکروانبر FGM فقط تحت اثر ممان حرارتی. زمانی که ولتاژ اعمالی صفر باشد، نیروی الکترواستاتیکی ایجاد نخواهد شد و ممان خمشی ناشی از نیروی خارجی صفر خواهد بود، $M=0$. بنابراین معادله‌ی حاکم بر جابه‌جایی استاتیکی هر یک از میکروتیرهای میکروانبر FGM مورد نظر به این صورت خواهد بود:

$$-(EI)_{FGM}\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}=M_T \quad (\text{۱۲})$$

معادله‌ی بی‌بعد حاکم نیز به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{\partial^2\hat{w}}{\partial\hat{x}^2}=\alpha_3 M_T \quad (\text{۱۳- الف})$$

$$\alpha_3=\frac{-L^2}{g(EI)_{FGM}} \quad (\text{۱۳- ب})$$

برای به دست آوردن جابه‌جایی میکروانبر به بررسی استاتیکی جداگانه‌ی حرکت، تحت اثر نیروی الکترواستاتیکی و تغییرات دما می‌پردازیم.

تحلیل استاتیکی

میکروانبر FGM فقط تحت اثر نیروی غیر خطی الکترواستاتیک. با توجه به غیرخطی بودن معادلات حاکم، ابتدا با استفاده از روش خطی‌سازی مرتبه به مرتبه (Step by step linearization method (SSLM)) [21]، معادلات را خطی و سپس با استفاده از روش باقی‌مانده وزنی گالرکین (Galerkin based weighted residual method) [50] معادلات خطی را حل می‌کنیم. به همین منظور در ابتدا تمام جملات معادله‌ی (۱۱) برای تیرهای I و II را به یک طرف منتقل می‌کنیم:

$$(\alpha_1)_I \frac{d^4\hat{w}_{s_I}}{d\hat{x}^4} - (\alpha_2)_I \left(\frac{V}{1-\hat{w}_{s_I}(\hat{x})-\hat{w}_{s_{II}}(\hat{x})}\right)^2 = 0$$

(۱۴- الف)

$$(\alpha_1)_{II} \frac{d^4\hat{w}_{s_{II}}}{d\hat{x}^4} - (\alpha_2)_{II} \left(\frac{V}{1-\hat{w}_{s_I}(\hat{x})-\hat{w}_{s_{II}}(\hat{x})}\right)^2 = 0$$

(۱۴- ب)

سپس برای استفاده از روش SSLM، تابع $\hat{w}_s^k$ را به عنوان جابه‌جایی استاتیکی ناشی از V^k تعریف می‌کنیم، با افزایش ولتاژ به میزان δV و رسیدن آن به مقدار جدید V^{k+1}، تابع جابه‌جایی نیز به میزان $\delta\hat{w}_s$ افزایش یافته و به مقدار جدید $\hat{w}_s^{k+1}$ می‌رسد:

$$V^{k+1} = V^k + \delta V$$ (۱۵- الف)

$$\hat{w}_{s_I}^{k+1} = \hat{w}_{s_I}^k + \delta\hat{w}_{s_I}$$ (۱۵- ب)

$$\hat{w}_{s_{II}}^{k+1} = \hat{w}_{s_{II}}^k + \delta\hat{w}_{s_{II}}$$ (۱۵- ج)

بنابراین معادلات (۱٤) برای مرحله‌ی $(k+1)^{th}$ به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$(\alpha_1)_I \frac{d^4\hat{w}_{s_I}^{k+1}}{d\hat{x}^4} - (\alpha_2)_I \left(\frac{V^{k+1}}{1-\hat{w}_{s_I}^{k+1}-\hat{w}_{s_{II}}^{k+1}}\right)^2 = 0$$

(۱٦- الف)

$$(\alpha_1)_{II} \frac{d^4\hat{w}_{s_{II}}^{k+1}}{d\hat{x}^4} - (\alpha_2)_{II} \left(\frac{V^{k+1}}{1-\hat{w}_{s_I}^{k+1}-\hat{w}_{s_{II}}^{k+1}}\right)^2 = 0$$

(۱٦- ب)

روشن است که با کوچک بودن گام افزایش ولتاژ δV، تغییر در تابع جابه‌جایی $\delta\hat{w}_s$ نیز کوچک خواهد بود، بنابراین با استفاده از اصل تغییرات و نگه داشتن جملات با مشتق مرتبه اول از بسط تیلور، معادلات خطی مورد نظر برای محاسبه‌ی $\delta\hat{w}_s$ ها به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$(\alpha_1)_I \frac{d^4\delta\hat{w}_{s_I}}{d\hat{x}^4} - (\alpha_2)_I \left[\frac{\partial F}{\partial\hat{w}_{s_I}}\delta\hat{w}_{s_I} + \frac{\partial F}{\partial\hat{w}_{s_{II}}}\delta\hat{w}_{s_{II}} + \frac{\partial F}{\partial V}\delta V\right] = 0$$

(۱۷- الف)

$$(\alpha_1)_{II} \frac{d^4\delta\hat{w}_{s_{II}}}{d\hat{x}^4} - (\alpha_2)_{II} \left[\frac{\partial F}{\partial\hat{w}_{s_I}}\delta\hat{w}_{s_I} + \frac{\partial F}{\partial\hat{w}_{s_{II}}}\delta\hat{w}_{s_{II}} + \frac{\partial F}{\partial V}\delta V\right] = 0$$

(۱۷- ب)

برای حل معادلات اخیر از روش گالرکین استفاده می‌نماییم، بدین منظور، افزایش تابع جابه‌جایی را به صورت ترکیب خطی از n شکل مود نرمال تیر، $\varphi_j(\hat{x}),\ j=1,2,3,...$، در نظر می‌گیریم:

$$\delta\hat{w}_{s_I}(\hat{x}) = \sum_{j=1}^{n} c_{Ij}\varphi_j(\hat{x})$$ (۱۸- الف)

$$\delta\hat{w}_{s_{II}}(\hat{x}) = \sum_{j=1}^{n} c_{IIj}\varphi_j(\hat{x})$$ (۱۸- ب)

با جای‌گذاری روابط (۱۸) در معادله‌ی (۱۷) و ضرب طرفین معادله در $\varphi_i(\hat{x})$ و انتگرال‌گیری در بازه‌ی $\hat{x}=0$ تا $\hat{x}=1$، ۲n معادله‌ی جبری به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$\sum_{j=1}^{n} C_{I\,j} K_{m_{Iij}} - C_{I\,j} K1_{e_{Iij}} - C_{II\,j} K2_{e_{Iij}} = f_{I_i} \qquad \text{(۱۹- الف)}$$

$$\sum_{j=1}^{n} C_{II\,j} K_{m_{IIij}} - C_{I\,j} K1_{e_{IIij}} - C_{II\,j} K2_{e_{IIij}} = f_{II_i} \qquad \text{(۱۹- ب)}$$

$$i = 1, 2 \ldots n$$

که در آن:

$$K_{m_{Iij}} = \int_0^1 (\alpha_1)_I \varphi^4{}_j(\hat{x})\varphi_i(\hat{x})d\hat{x}$$

$$K_{m_{IIij}} = \int_0^1 (\alpha_1)_{II} \varphi^4{}_j(\hat{x})\varphi_i(\hat{x})d\hat{x}$$

$$K1_{e_{Iij}} = \int_0^1 (\alpha_2)_I \frac{\partial F}{\partial \hat{w}_{s_I}} \varphi_j(\hat{x})\varphi_i(\hat{x})d\hat{x}$$

$$K1_{e_{IIij}} = \int_0^1 (\alpha_2)_{II} \frac{\partial F}{\partial \hat{w}_{s_I}} \varphi_j(\hat{x})\varphi_i(\hat{x})d\hat{x}$$

$$K2_{e_{Iij}} = \int_0^1 (\alpha_2)_I \frac{\partial F}{\partial \hat{w}_{s_{II}}} \varphi_j(\hat{x})\varphi_i(\hat{x})d\hat{x}$$

$$K2_{e_{IIij}} = \int_0^1 (\alpha_2)_{II} \frac{\partial F}{\partial \hat{w}_{s_{II}}} \varphi_j(\hat{x})\varphi_i(\hat{x})d\hat{x}$$

$$f_{I_i} = \int_0^1 (\alpha_2)_I \frac{\partial F}{\partial V} \delta V \varphi_i(\hat{x})d\hat{x}$$

$$f_{II_i} = \int_0^1 (\alpha_2)_{II} \frac{\partial F}{\partial V} \delta V \varphi_i(\hat{x})d\hat{x}$$

$$\frac{\partial F}{\partial \hat{w}_{s_I}} = \frac{\partial F}{\partial \hat{w}_{s_{II}}} = \frac{2V^2}{\left(1-\hat{w}_I-\hat{w}_{II}\right)^3}$$

$$\frac{\partial F}{\partial V} = \frac{2V}{\left(1-\hat{w}_I-\hat{w}_{II}\right)^2}$$

از حل دستگاه معادلات (۱۹- الف و ب) با ۲n معادله و ۲n مجهول، ضرایب مجهول $C_{I\,j}$ و $C_{II\,j}$ و جابه‌جایی هر یک از تیرها برای هر ولتاژ به‌دست می‌آید. در نتیجه جابه‌جایی استاتیکی کلی میکروانبر FGM به دست خواهد آمد:

$$\hat{w}_{Total} = \hat{w}_{s_I} + \hat{w}_{s_{II}} \qquad \text{(۲۰)}$$

میکروانبر FGM فقط تحت اثر ممان حرارتی. زمانی که ولتاژ اعمالی صفر می‌باشد نیروی خارجی و ممان خمشی در سطح مقطع مورد نظر صفر خواهد بود، بنابراین معادله‌ی بی‌بعد حاکم بر جابه‌جایی تیرها به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{\partial^2 \hat{w}_{s_I}}{\partial \hat{x}^2} = (\alpha_3)_I M_T \qquad \text{(۲۱- الف)}$$

$$\frac{\partial^2 \hat{w}_{s_{II}}}{\partial \hat{x}^2} = (\alpha_3)_{II} M_T \qquad \text{(۲۱- ب)}$$

که $\hat{w}_{s_I}$ و $\hat{w}_{s_{II}}$ به ترتیب نشان دهنده‌ی تابع جابه‌جایی استاتیکی میکروتیرهای I و II تحت تغییرات دمایی هستند که با انتگرال‌گیری از معادلات اخیر و توجه به شرایط مرزی مسئله، بر حسب $\hat{x}$ به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$\hat{w}_{s_I} = \left(\frac{(\alpha_3)_I M_T}{2}\right)\hat{x}^2 \qquad \text{(۲۲- الف)}$$

$$\hat{w}_{s_{II}} = \left(\frac{(\alpha_3)_{II} M_T}{2}\right)\hat{x}^2 \qquad \text{(۲۲- ب)}$$

$$\hat{w}_{Total} = \hat{w}_{s_I} + \hat{w}_{s_{II}} \qquad \text{(۲۲- ج)}$$

نتایج عددی

جابه‌جایی استاتیکی و پایداری میکروانبر FGM مورد نظر که با توجه به درصد حجمی سرامیک در سطح داخلی تیرها $(z = h/2)$، به پنج نوع $V_c = 0\%$ ، $V_c = 25\%$ ، $V_c = 50\%$ ، $V_c = 75\%$ و $V_c = 100\%$ طبقه‌بندی شده است در سه حالت بررسی می‌شود: ۱- حالتی که تغییر دمایی وجود نداشته باشد و میکروانبر فقط تحت اعمال نیروی

الکترواستاتیک ناشی از ولتاژ DC باشد: $(\Delta T = 0, V \neq 0)$. ۲- حالتی که ولتاژ اعمالی صفر باشد و میکروانبر فقط تحت تغییر دمای محیط قرار داشته باشد: $(\Delta T \neq 0, V = 0)$. ۳- حالتی که میکروانبر ابتدا تحت یک تغییر دمایی قرار گرفته و سپس به آن ولتاژ DC اعمال شود: $(\Delta T \neq 0, V \neq 0)$. تیرهای میکروانبر مورد بررسی در این مقاله که خصوصیات آن در جداول (۲و۱) نشان داده شده است، کاملاً متقارن در نظر گرفته شده است، بنابراین در هر سه حالت جابه‌جایی آنها تحت شرایط مختلف، مساوی خواهد بود.

جدول ۱ خصوصیات هندسی تیرهای میکروانبر FGM

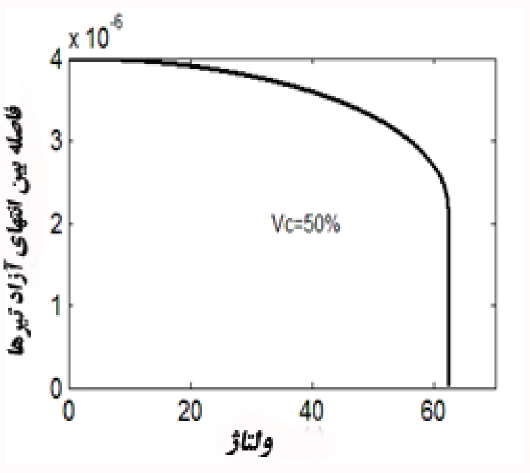
پارامترها	مقادیر
طول (L)	۲۰۰µm
عرض (b)	٥µm
ضخامت (h)	۲٫۹µm
فاصله‌ی اولیه (g)	٤µm
ثابت دی الکتریک هوا (ε_0)	۸٫۸٥pF/m

جدول ۲ خصوصیات مادی تیرهای میکروانبر FGM

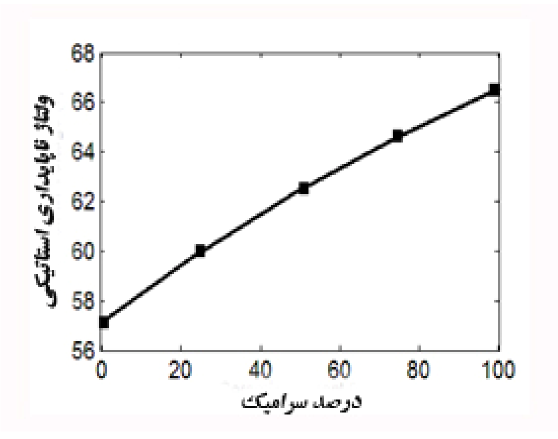
پارامترها	سرامیک	فلز
نوع ماده	آلومینا	فولاد
مدول الاستیسیته (E)	۳۹۰GPa	۲۱۰GPa
ضریب پواسون (ν)	۰٫۲٤	۰٫۲۹
چگالی (ρ)	۳۹٤۰Kg/m^3	۷۸٥۰Kg/m^3
ضریب انبساط حرارتی خطی (α)	۷٫۲ (10^{-6}/°C)	۱۳ (10^{-6}/°C)

حالت $(\Delta T = 0, V \neq 0)$

جابه‌جایی استاتیکی میکروانبر FGM در اثر ولتاژ DC. شکل (۳- الف) تغییر فاصله‌ی بین دو تیر میکروانبر FGM $(V_c = 50\%)$ را برای ولتاژهای مختلف نشان می‌دهد که با افزایش ولتاژ رفته رفته سفتی آن کاهش می‌یابد. تا این‌که در یک لحظه صفر شده و ناپایداری اتفاق می‌افتد. شکل (۳- ب) نیز نشان دهنده‌ی تأثیر افزایش درصد سرامیک بر ولتاژ ناپایداری استاتیکی میکروانبر است که با افزایش آن، سفتی معادل سیستم افزایش یافته و در نتیجه جابه‌جایی کاهش یافته و ناپایداری دیرتر اتفاق می‌افتد.



(الف)

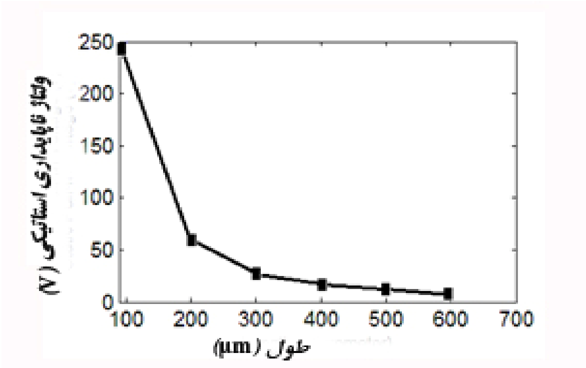


(ب)

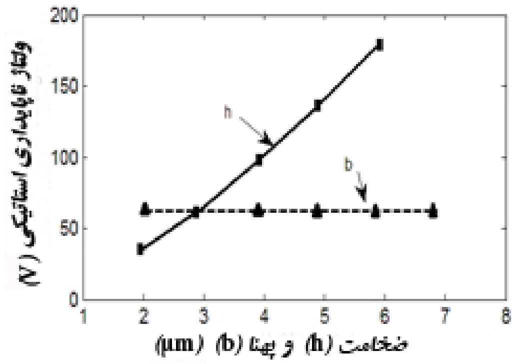
شکل ۳ پاسخ استاتیکی میکروانبر FGM به اعمال ولتاژ: الف) منحنی تغییرات فاصله‌ی بین انتهای آزاد تیرها (Gap) در برابر ولتاژ اعمالی $(V_c = 50\%)$ ب) مقایسه‌ی ولتاژ ناپایداری استاتیکی برای درصدهای مختلف سرامیک

شکل (٤- الف) تأثیر افزایش طول تیرها بر ولتاژ ناپایداری استاتیکی میکروانبر FGM $(V_c = 50\%)$ را

نشان می‌دهد. همان‌طورکه مشخص است با افزایش طول، جابه‌جایی تیرها افزایش پیدا کرده و ناپایداری در ولتاژهای پایین‌تری اتفاق می‌افتد. شکل (٤- ب) نیز افزایش ولتاژ ناپایداری با افزایش ضخامت تیرها، h، و بی‌تأثیری بودن تغییر پهنای تیرها، b، بر ناپایداری میکروانبر را نشان می‌دهد.



(الف)

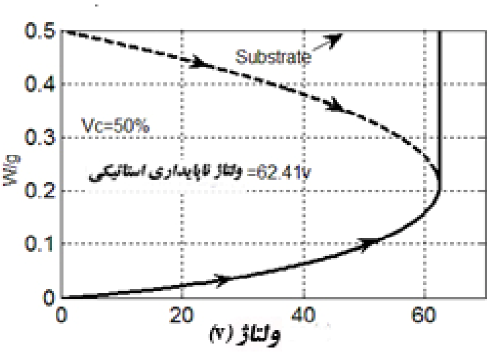


(ب)

شکل ٤ مقایسه‌ی ولتاژ ناپایداری استاتیکی میکروانبر FGM در حالت $(V_c = 50\%)$ برای خصوصیات هندسی مختلف: الف) تغییر طول ب) تغییر ضخامت (h) و پهنا (b)

بررسی نقاط تعادل سیستم ناشی از اعمال استاتیکی ولتاژ DC. شکل (۵) جابه‌جایی تیرهای میکروانبر FGM در حالت $(V_c = 50\%)$ ناشی از اعمال استاتیکی ولتاژ DC را نشان می‌دهد که از دو شاخه‌ی پایدار و ناپایدار تشکیل شده است.

شاخه‌ی پایدار پایینی، نشانه‌ی نقاط پایدار (مرکز) و شاخه‌ی ناپایدار بالایی، نشان دهنده‌ی نقاط ناپایدار (زینی) برای ولتاژهای مختلف می‌باشد. به عبارت دیگر برای هر ولتاژ خاص، یک نقطه‌ی پایدار و یک نقطه‌ی ناپایدار وجود دارد که با افزایش ولتاژ این نقاط در یک نقطه (نقطه A) به هم می‌رسند؛ ولتاژ متناظر با این نقطه، ولتاژ بحرانی یا ولتاژ ناپایداری استاتیکی سیستم می‌باشد. لازم به ذکر است که یک نقطه‌ی تعادل دیگر هم در طرف دیگر صفحه‌ی میانی (substrate) وجود دارد که از لحاظ فیزیکی غیر ممکن می‌باشد.

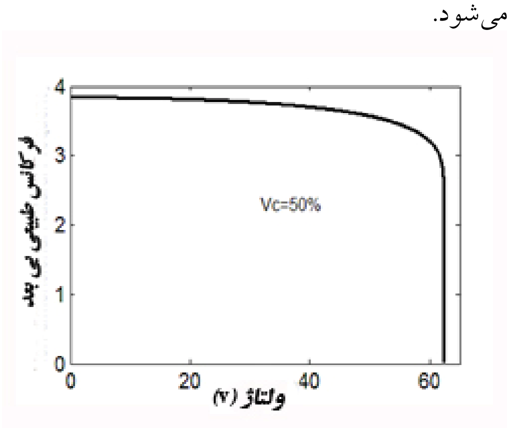


شکل ۵ **نسبت** جابه‌جایی استاتیکی انتهای آزاد به فاصله‌ی اولیه تیرهای میکروانبر FGM (W/g) ناشی از اعمال ولتاژ در حالت $(V_c = 50\%)$

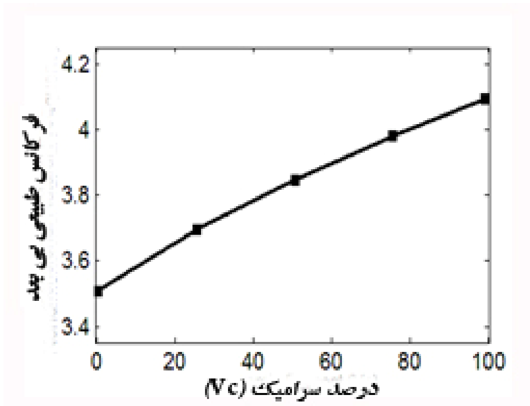
فرکانس طبیعی. فرکانس طبیعی بی‌بعد سیستم، $\omega = \sqrt{\frac{K_m - K1_e - K2_e}{M}}$، تابع چهار عامل سفتی مکانیکی، K_m، سفتی الکتریکی میکروتیرهای I و II، $K1_e$ و $K2_e$، و جرم معادل سیستم، $M = \int_0^1 \varphi_j(\hat{x})\varphi_i(\hat{x})d\hat{x}$، می‌باشد. با توجه به رابطه‌ی (۱۹) و رابطه‌ی بالا، با تغییرات ولتاژ، جرم و سفتی مکانیکی ثابت مانده ولی سفتی الکتریکی تغییر می‌کند.

در شکل (٦- الف) تغییرات فرکانس طبیعی بی‌بعد میکروانبر FGM در حالت $(V_c = 50\%)$ در برابر تغییرات ولتاژ DC نشان داده شده است. همان طور که مشخص است با افزایش ولتاژ، سفتی معادل سیستم، $K_m - K1_e - K2_e$، کاهش یافته و با توجه به ثابت

ماندن جرم معادل، فرکانس طبیعی سیستم کاهش می‌یابد تا این‌که در یک لحظه به صفر رسیده و ناپایداری اتفاق می‌افتد. شکل (٦- ب) تأثیر افزایش درصد سرامیک بر فرکانس طبیعی سیستم را نشان می‌دهد که افزایش آن باعث افزایش سفتی معادل سیستم و در نتیجه منجر به افزایش فرکانس طبیعی می‌شود.



(الف)



(ب)

شکل ٦ فرکانس طبیعی بی‌بعد (Nondimensional Natural Frequency) میکروانبر FGM: الف) تغییر فرکانس ناشی از تغییرات ولتاژ ($V_c = 50\%$) ب) مقایسه‌ی فرکانس طبیعی بی‌بعد برای درصدهای مختلف سرامیک

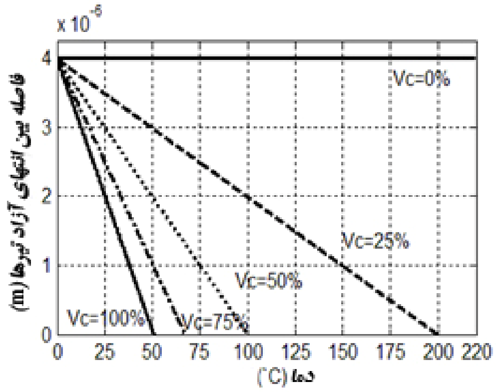
با توجه به این‌که در تحقیقات پیشین فقط میکروانبر با ماده همگن و از یک جنس بررسی شده است، لذا برای فراهم کردن امکان بررسی دقت روش و مقایسه نتایج با نتایج تئوری و تجربی مرجع [51]، در مدل ارایه شده در مقاله حاضر با در نظر گرفتن $V_c = 0\%$ میکروانبر FGM به میکروانبر با ماده همگن و از یک جنس تبدیل می‌شود. نتایج برای دو میکروانبر با ابعاد هندسی و مکانیکی یکسان در جدول (۳) مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج حاکی از دقت مناسب روش مورد استفاده در این مقاله می‌باشد.

جدول ۳ مقایسه‌ی نتایج به دست آمده برای میکروانبر همگن با نتایج مرجع [51]

ولتاژ ناپایدار استاتیکی		پارامترها			
مقاله حاضر	F. Shi et al. [51]	ضخامت (h)	فاصله‌ی اولیه (g)	مدول الاستیسیته (E)	طول (L)
۷۹٫۷۶V	۷۸V	۲٫۹ µm	٤ µm	٤١٠ GPa	۲۰۰µm

حالت $(\Delta T \neq 0, V = 0)$

در شکل (۷) تغییر فاصله‌ی بین انتهای آزاد تیرهای میکروانبر FGM ناشی از تغییرات دمای محیط به عنوان عامل تحریک به ازای درصدهای مختلف سرامیک نشان داده شده است. همان طور که در نمودار نیز مشخص است با افزایش دما، فاصله‌ی بین تیرهای میکروانبر رفته رفته کاهش می‌یابد و به صفر می‌رسد.



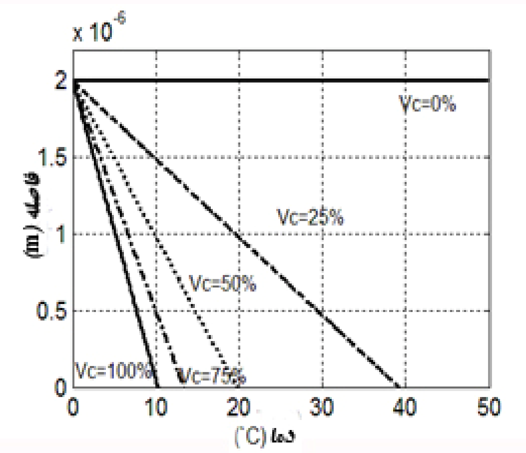
شکل ۷ مقایسه تغییر فاصله‌ی بین انتهای آزاد تیرهای میکروانبر FGM (Gap) برای درصدهای مختلف سرامیک ناشی از تغییر دمای محیط (T)

کاهش فاصله‌ی بین تیرها به این دلیل است که هر چه درصد سرامیک افزایش یابد، اختلاف میان ضریب‌های انبساط حرارتی نیز در صفحات مختلف تیر افزایش یافته و در نتیجه با ایجاد ممان حرارتی و افزایش آن، جابه‌جایی تیرها نیز افزایش می‌یابد. همان طور که از شکل (۷) مشخص است با افزایش درصد سرامیک به دلیل افزایش یک‌نواخت ضریب تغییر دما در تابع جابه‌جایی (رابطه ۷- ب)، برای رسیدن به جابه‌جایی یکسان در هر یک از میکروانبرها به تغییر دماهای کوچک‌تری نیاز است. ولی برای تغییر دمای یکسان اختلاف میان جابه‌جایی برای درصدهای مختلف ثابت می‌باشد. هم‌چنین برای حالتی که تیر از فلز خالص تشکیل شده باشد به علت یک‌نواختی ضریب‌های انبساط حرارتی، ممان حرارتی نیز در تیر ایجاد نمی‌شود و تغییر دما تأثیری بر جابه‌جایی نخواهد داشت.

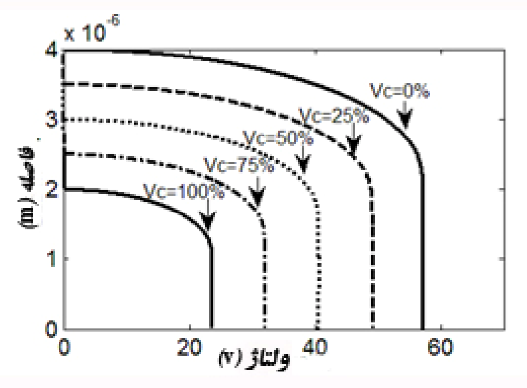
در این حالت برای فراهم کردن امکان مقایسه نتایج به دست آمده، با توجه به این که در تحقیقات پیشین میکروانبر FGM مورد بررسی قرار نگرفته است بنابراین با ثابت نگه داشتن یکی از جفت تیرهای میکروانبر FGM، تغییر فاصله‌ی بین انتهای آزاد تیرها که خصوصیات یکسانی با تک‌تیر FGM مورد مطالعه در مرجع [45] دارد، ناشی از تغییر دما، به ازای درصدهای مختلف سرامیک، به دست آمد. نتایج به دست آمده که در شکل (۸) نشان داده شده است کاملاً با نتایج ارایه شده در مرجع [45] هماهنگ می‌باشد؛ ولی باید در نظر داشت که تغییر فاصله بین انتهای آزاد تیرها در میکروانبر ناشی از خیز هر دو تیر خواهد بود.

حالت $(\Delta T \neq 0,\ V \neq 0)$

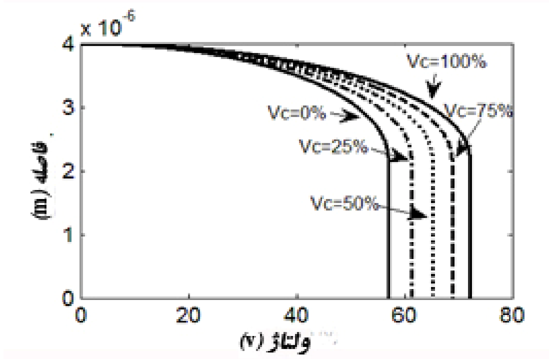
در این بحث فرض می‌شود که میکروانبر FGM ابتدا تحت تغییر دمای محیطی $\Delta T = 25°$ قرار گرفته است و سپس ولتاژ استاتیکی به آن اعمال شود. همان طور که در شکل (۹- الف) نشان داده شده است به دلیل کاهش فاصله‌ی اولیه‌ی بین تیرها که ناشی از افزایش دمای محیط می‌باشد، میکروانبر در ولتاژهای پایین‌تری به ناپایداری می‌رسد که با افزایش درصد سرامیک و در نتیجه افزایش ممان حرارتی، ولتاژ ناپایداری نیز کاهش بیشتری می‌یابد. با وجود این‌که حرارت می‌تواند به عنوان یک نیروی محرک باعث جابه‌جایی میکروتیرها شود ولی در مواردی نیز لازم است برای برداشتن قطعات با اندازه‌های مختلف مانع از حرکت اولیه‌ی تیرها و کاهش فاصله‌ی اولیه‌ی آنها توسط تغییر دمای محیط شد. برای این منظور می‌توان از میکروانبرهایی با آرایش متقارن مانند $P = P_m e^{\alpha(|z|)}$ استفاده کرد که صفحه‌ی میانی تیرهای آن از فلز خالص تشکیل شده و صفحات بالایی و پایینی ترکیب یکسانی از سرامیک و فلز داشته باشند. همان‌طور که در شکل (۹- ب) نشان داده شده است در این حالت افزایش دمای محیط به علت متقارن بودن ضریب‌های انبساط حرارتی و عدم ایجاد ممان حرارتی، تأثیری بر جابه‌جایی اولیه‌ی تیرها نخواهد داشت و علاوه بر مقاومت حرارتی بالا، میکروانبر FGM در برابر تغییر دما، همانند میکروانبر ساخته شده از یک نوع ماده‌ی همگن عمل خواهد کرد. به عبارت دیگر تغییر دما، باعث تغییر فاصله تیرهای میکروانبر نخواهد شد.



شکل ۸ مقایسه تغییر فاصله‌ی بین انتهای آزاد جفت میکروتیرهای FGM (Gap) برای درصدهای مختلف سرامیک ناشی از تغییر دمای محیط (T) با فرض ثابت بودن یکی از میکرو تیرها



(الف)



(ب)

شکل ۹ مقایسه‌ی تغییر فاصله‌ی بین انتهای آزاد تیرهای میکروانبر FGM (Gap) ناشی از تغییر دمای اولیه یکسان $\Delta T = 25°$ و اعمال ولتاژ برای دو آرایش مختلف: الف) $P = P_m e^{\beta\left(z+\frac{h}{2}\right)}$ ب) $P = P_m e^{\alpha(|z|)}$

نتیجه‌گیری

در این مقاله رفتار مکانیکی میکروانبر FGM که یک سطح میکروتیرهای آن از فلز خالص تشکیل شده و سطح دیگر ترکیبی از فلز و سرامیک می‌باشد در پنج حالت برای درصدهای مختلف سرامیک در اثر اعمال ولتاژ و تغییر درجه حرارت بررسی شد. در ابتدا معادلات غیرخطی حاکم بر حرکت جفت میکروتیرهای میکروانبر تحت اثر اعمال ولتاژ DC با استفاده از تئوری اویلر- برنولی استخراج گردید و سپس به کمک روش‌های خطی‌سازی مرتبه به مرتبه و گالرکین حل و پاسخ استاتیکی به دست آمد. نتایج بررسی نشان داد که با افزایش ولتاژ، فاصله‌ی بین تیرها و فرکانس طبیعی سیستم کاهش می‌یابد و با افزایش درصد سرامیک، سفتی معادل سیستم افزایش یافته و در نتیجه ولتاژ ناپایداری افزایش می‌یابد. افزایش طول و ضخامت نیز به ترتیب باعث کاهش و افزایش ولتاژ ناپایداری شده و تغییر پهنا تأثیری بر ناپایداری میکروانبر ندارد.

در غیاب ولتاژ، تنها دلیلی که باعث خیز جفت تیرهای میکروانبر می‌شود تغییر دمای محیط، ΔT، است که افزایش آن، باعث خیز بیشتر می‌شود. با افزایش درصد سرامیک اختلاف بین ضریب‌های انبساط حرارتی در لایه‌های مختلف تیر نیز افزایش یافته و ممان حرارتی ایجاد شده باعث جابه‌جایی بیشتر می‌شود. اما برای حالتی که تیرها از فلز خالص تشکیل شده‌اند به علت عدم ایجاد ممان حرارتی، تیرها بدون خیز باقی می‌مانند. هم‌چنین به دلیل افزایش یک‌نواخت ضریب تغییر دما در تابع جابه‌جایی، برای رسیدن به جابه‌جایی یکسان در هر یک از جفت تیرهای میکروانبر با افزایش درصد سرامیک به تغییر دماهای کوچک‌تری نیاز است، ولی تحت تغییر دمای یکسان، اختلاف بین خیز تیرها برای درصدهای مختلف سرامیک ثابت است.

در حالتی دیگر فرض شد که میکروانبر FGM تحت تغییر دمای اولیه‌ی ΔT قرار گیرد و سپس به آن ولتاژ DC به صورت استاتیکی اعمال شود. مقایسه‌ی ولتاژ ناپایداری استاتیکی برای حالت‌های مختلف نشان داد که افزایش درصد سرامیک باعث خیز بیشتر شده و در نتیجه فاصله‌ی اولیه بین تیرها کاهش بیشتری می‌یابد و سیستم تحت ولتاژ پایین‌تری به ناپایداری می‌رسد. اما در حالتی که تیر از فلز خالص تشکیل شده باشد تغییر دما هیچ تأثیری بر ولتاژ ناپایداری ندارد. برای جلوگیری از کاهش فاصله‌ی اولیه بین بازوها ناشی از تغییر دمای اولیه و کاهش ولتاژ ناپایداری، نوع

دیگری از میکروانبر FGM مورد بررسی قرار گرفت که در آن آرایــش مــواد ســازنده، متقــارن و مطــابق تــابع $P = P_m e^{\alpha(|z|)}$ در نظر گرفته شد. مشاهده شد که تغییر دما، حتی برای درصدهای بالای سرامیک، به علت عدم ایجاد ممان حرارتی هیچ تأثیری بر خیــز اولیــه و ولتــاژ ناپایداری ندارد.

مراجع

1. Volland, B.E., Heerlein, H. and Rangelow, I.W., "Electrostatically driven microgripper", *Microelectronic Engineering*, Vol. 61-62, pp. 1015–1023, (2002).
2. Hesselbach, J., Wrege, J. and Raatz, A., "Micro handling devices supported by electrostatic force", Annals of the *CIRP*, Vol. 56, pp. 45-48, (2007).
3. Biganzoli, F. and Fantoni, G., "A self-centering electrostatic microgripper", *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 27(3), pp. 136–144, (2008).
4. Nah, S.K. and Zhong, Z.W., "A microgripper using piezoelectric actuation for micro-object manipulation", *Sensors and Actuators A*, Vol. 133, pp. 218-224, (2007).
5. Zubir, M.N.M., Shirinzadeh, B. and Tian, Y., "A new design of piezoelectric driven compliant-based microgripper for micromanipulation", *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 44, pp. 2248-2264, (2009).
6. Zubir, M.N.M., Shirinzadeh, B. and Tian, Y., "Development of a novel flexure-based microgripper for high precision micro-object manipulation", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 150, pp. 257–266, (2009).
7. Butefisch, S., Seidemann, V. and Buttgenbach, S., "Novel micro-pneumatic actuator for MEMS", *Sensors and Actuators A*, Vol. 97-98, pp. 638-645, (2002).
8. Giouroudi, I., Hotzendorfer, H., Kosel, J., Andrijasevic, D. and Brenner, W., "Development of a microgripping system for handling of microcomponents", *Precision Engineering*, Vol. 32, pp. 148–152, (2008).
9. Blideran, M.M., Bertsche, G., Henschel, W. and Kern, D.P., "A mechanically actuated silicon microgripper for handling micro- and nanoparticles", *Microelectronic Engineering*, Vol. 83, pp. 1382–1385, (2006).
10. Chronis, N. and Lee, L.P., "Electrothermally activated su-8 microgripper for single cell manipulation in solution", *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 14, pp. 857-863, (2005).
11. Volland, B.E., Ivanova, K., Ivanov, T., Sarov, Y., Guliyev, E., Persaud, A., Zollner, J.P., Klett, S., Kostic, I. and Rangelow, I.W., "Duo-action electro thermal micro gripper", *Microelectronic Engineering*, Vol. 84, pp. 1329-1332, (2007).
12. Sardan, O., Peterson, D.H., Molhave, K., Sigmund, O. and Boggild, P., "Topology optimized electrothermal polysilicon microgrippers", *Microelectronic Engineering*, Vol. 85, pp. 1096-1099, (2008).
13. Andersen, K.N., Carlson, K., Petersen, D.H., Molhave, K., Eichhorn, V., Fatikow, S. and Boggild, P.,

"Eletrothermal microgrippers for pick-and-place operations", *Microelectronic Engineering*, Vol. 85, pp. 1128-1130, (2008).

14. Solano, B. and Wood, D., "Design and testing of a polymeric microgripper for cell manipulation", *Microelectronic Engineering*, Vol. 84, pp. 1219–1222, (2007).
15. Ivanova, K., Ivanov, T., Badar, A., Volland, B.E., Rangelow, I.W., Andrijasevic, D., Sumecz, F., Fischer, S., Spitzbart, M., Brenner, W. and Kostic, I., "Thermally driven microgripper as a tool for micro assembly", *Microelectronic Engineering*, Vol. 83, pp. 1393–1395, (2006).
16. Ng, T.Y., Jiang, T.Y., Li, H., Lam, K.Y. and Reddy, J.N., "A coupled field study on the non-linear dynamic characteristics of an electrostatic micropump", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 273, pp. 989-1006, (2004).
17. Dumas, N., Trigona, C., Pons, P., Latorre, L. and Nouet, P., "Design of smart drivers for electrostatic MEMS switches", *Sensors and Actuators A*, Vol. 167, pp. 422-432, (2011).
18. Sadeghian, H., Rezazadeh, G. and Osterberg, P.M., "Application of the generalized differential quadrature method to the study of pull-In phenomena of MEMS switches", *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 16, pp. 1334-1340, (2007).
19. Hu, F., Yao, J., Qiu, C. and Ren, H., "A MEMS micromirror driven by electrostatic force", *Journal of Electrostatics*, Vol. 68, pp. 237-242, (2010).
20. Song, M.T., Cao, D.Q., Zhu, W.D., "Dynamic analysis of a micro-resonatoer driven by electrostatic combs", *Cummun Nonlinear Sci Numer Simulat*, Vol. 16, pp. 3425-3442, (2011).
21. Rezazadeh, G., Tahmasebi, A. and Zubstov, M., "Application of piezoelectric layers in electrostatic MEM actuators: controlling of pull-in voltage", *Microsystem Technologies*, Vol. 12, pp. 1163-1170, (2006).
22. Parate, O. and Gupta, N., "Material selection for electrostatic microactuators using Ashby approach", *Materials and Design*, Vol. 32, pp. 1577-1581, (2011).
23. Ogawa, E., Ikehashi, T., Saito, T., Yamazaki, H., Masunishi, K., Tomizawa, Y., Ohguro, T., Sugizaki, Y., Toyoshima, Y. and Shibata, H., "A creep-immune electrostatic actuator for RF-MEMS tunable capacitor", *Sensors and Actuators A*, Vol. 169(2), pp. 373-377, (2011).
24. Kim, C.J., Pisano, A.P., Muller, R.S. and Lim, M.G., "Polysilicon microgripper", *Sensors and Actuators*, pp. 48-51, (1990).
25. Biganzoli, F. and Fantoni, G., "Contactless electrostatic handling of microcomponents", *Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 218(12), pp. 1795-1806, (2004).
26. Millet, O., Bernardoni, P., Regnier, S., Bidaud P., Tsitsiris, E., Collard, D. and Buchaillot, L., "Electrostatic actuated micro gripper using an amplification mechanism", *Sensors and Actuators A*, Vol. 114, pp. 371-378, (2004).
27. Kawamoto, H. and Tsuji, K., "Manipulation of small particles utilizing electrostatic force", *Advanced Powder Technology*, Vol. 22(5), pp. 602-607, (2010).
28. Wierzbicki, R., Houston, K., Heerlein H., Barth, W., Debski, T., Eisinberg, A., Menciassi, A., Carrozza, M.C. and Dario, P., "Design and fabrication of an electrostatically driven microgripper for

blood vessel manipulation", *Microelectronic Engineering*, Vol. 83, pp. 1651-1654, (2006).

29. Chen, T., Sun, L., Chen, L., Rong, W. and Li, X., "A hybrid-type electrostatically driven microgripper with an integrated vacuum tool", *Sensors and Actuators A*, Vol. 158, pp. 320-327, (2010).
30. Bazaz, S.,A., Khan, F. and Shakoor, R.I., "Design, simulation and testing of electrostatic SOI MUMPs based microgripper integrated with capacitive contact sensor", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 167(1), pp. 44–53, (2011).
31. Koizumi, M., "The concept of FGM, proceedings of the second international symposium on functionally gradient materials at the third international ceramic science and technology congress", San Francisco, (1992).
32. Suresh, S., "Modeling and design of multi-layered and graded materials", *Material Science*, Vol. 42, pp. 243-251, (1997).
33. Birman, V. and Byrd, L.W., "Modeling and analysis of functionally graded materials and structures", *Applied Mechanics Reviews*, Vol. 60, pp. 195-216, (2007).
34. Mehrabadi, R.K. and Mirzaeian, V.R., "Buckling analyses of rectangular composed of functionally graded materials by the new version of dq method subjected to non-uniform distributed in-plane loading", *Journal of Solid Mechanics*, Vol. 1, pp. 58-72, (2009).
35. Pompe, W., Worch, H., Epple, M., Friess W., Gelinsky, M., Greil, P., Hempel, U., Scharnweber, D. and Schulte, K., "Functionally graded materials for biomedical applications", *Materials Science and Engineering*, Vol. 362, pp. 40-60, (2003).
36. Simsek, M., "Static analysis of a functionally graded beam under a uniformly distributed load by Ritz method", *International Journal of Engineering and Applied*, Vol. 3, pp. 1-11, (2009).
37. Wosko, M., Paszkiewicz, B., Piasecki, T., Prazmowska, J., Paszkiewicz, R., Szyszka, A., Macherzvnski, W. and Tlaczala, M., "Functionally Graded Structures of AIII-BV(N) Materials for Detectors", International Students and Young Scientists Workshop, Photonics and Microsystems, Wroclaw, poland, (2006).
38. Sadowski, T., Boniecki, M., Librant, Z. and Nakonieczny, K., "Theoretical prediction and experimental verification of temperature distribution in FGM cylindrical plates subjected to thermal shock", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, pp. 4461-4467, (2007).
39. Bian, Z.G., Lim, C.W. and Chen, W.Q., "On functionally graded beams with integrated surface piezoelectric layers", *Composite Structures*, Vol. 72, pp. 339-351, (2006).
40. Shariyat, M., "Vibration and dynamic buckling control of imperfect hybrid FGM plates with temperature-dependent material properties subjected to thermo-electro-mechanical loading conditions", *Composite Structures*, Vol. 88, pp. 240-252, (2009).
41. Zenkour, A.M. and Sobhy, M., "Thermal buckling of various types of FGM sandwich plates", *Composite Structures*, Vol. 93, pp.93-102, (2010).
42. Ke, L., Yang, J. and Kitipornchai, S., "Nonlinear free vibration of functionally graded carbon nanotube-reinforced composite beams", *Composite Structures*, Vol. 92, pp. 676-683, (2010).

43. Hasanyan, D.J., Betra, R.C. and Harutyunyan, S., "Pull-in instabilities in functionally graded microthermoelectromechanical systems", *Journal of Thermal Stresses*, Vol. 31, pp. 1006-1021, (2010).
44. Li, X.F., "A unified approach for analyzing static and dynamic behaviors of functionally graded Timoshenko and Euler-Bernoulli beams", *Journal of Sound and vibration*, Vol. 318, pp. 1210-1229, (2008).
45. Mohammadi-Alasti, B., Rezazadeh, G., Borgheei, A.M., Minaei, S. and Habibifar R., "On the mechanical behavior of a functionally graded micro-beam subjected to a thermal moment and nonlinear electrostatic pressure", *Composite Structures*, Vol. 93, pp. 1516-1525, (2011).
46. Kang, Y.A. and Li, X.F., "Bending of functionally graded cantilever beam with power-law non-linearity subjected to an end force", *International Journal of Non-Linear Mechanics*, Vol. 44, pp. 696-703, (2009).
47. Simsek, M., "Vibration analysis of a functionally graded beam under a moving mass by using different beam theories", *Composite Structures*, Vol. 92, pp. 904-917, (2010).
48. Murin, J., Aminbaghi, M. and Kutis, V., "Exact solution of the bending vibration problem of FGM beams with variation of material properties", *Engineering structures*, Vol. 32, pp. 1631-1640, (2010).
49. Timoshenko, S., "Strength of material", Part1. Van Nostrand, New York, (1930).
50. Saeedivahdat, A., Abdolkarimzadeh, F., Feyzi, A., Rezazadeh, G. and Tarverdilo, S., "Effect of thermal stresses on stability and frequency response of a capacitive microphone", *Microelectronics Journal*, Vol. 41(12), pp. 865-873, (2010).
51. Shi, F., Ramesh, P. and Mukherjee, S., "Simulation methods for micro-electro-mechanical structures (MEMS) with application to a microtweezer", *Computer & structures*, Vol. 56, pp. 769-783, (1995).